

BARTŁOMIEJ KRAWCZYK¹⁾PIOTR MACKIEWICZ²⁾DARIUSZ DOBRUCKI³⁾

USE OF PLASTIC WASTE IN MATERIALS FOR ROAD PAVEMENT CONSTRUCTION AND IMPROVED SUBGRADE

WYBRANE SPOSOBY WYKORZYSTANIA TWORZYW SZTUCZNYCH Z RECYKLINGU W MATERIAŁACH DO BUDOWY KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWYCH I PODŁOŻA ULEPSZONEGO

STRESZCZENIE. Tematem artykułu są badania nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu tworzyw sztucznych (potocznie zwanych plastikami) do wytworzenia nowych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz mieszanek związanych cementem, przeznaczonych do warstw konstrukcji nawierzchni drogowej oraz podłoża ulepszanego. Z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia odpady plastikowe stanowią alternatywne źródło materiałów mogących, po odpowiednim przetworzeniu, zastąpić klasyczne materiały wykorzystywane w budownictwie drogowym. W pierwszym etapie przeprowadzone zostały badania asfaltów z rozpuszczonym plastikiem oraz badania granulatu plastikowego, w odniesieniu do obowiązujących wymagań stawianych materiałom do wykorzystania w warstwach asfaltowych. Przeprowadzono również podstawowe badania mieszanki mineralno-asfaltowej, w której kruszywo kamienne zastąpiono granulatem plastikowym z recyklingu. W drugim etapie przeprowadzono badania wytrzymałości i mrozoodporności mieszanek związanych cementem z dodatkiem odpadów plastikowych. Przeanalizowano możliwości i ograniczenia w stosowaniu tego typu materiałów. Na podstawie wyników badań udowodniono możliwość wykorzystania odpadów plastikowych w materiałach stosowanych w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowych oraz podłożu ulepszonym. Wykazano przy tym istotne korzyści ekonomiczne i środowiskowe.

SŁOWA KLUCZOWE: mieszanki mineralno-asfaltowe, odpady plastikowe, recykling, warstwy związane cementem.

ABSTRACT. The article presents research on the possible use of recycled synthetic materials (plastics) in production of new asphalt mixtures and cement-bound materials intended as road pavement layers or improved subgrade. From technical and economic perspective, plastic waste constitutes an alternative source of materials that may, after adequate processing, replace classic materials used in road construction. The first stage of the research encompassed tests of bitumen containing dissolved plastic and tests of plastic aggregate, including comparison of the obtained results with current requirements for materials used in asphalt layers. Tests were also performed on an asphalt mixture in which mineral aggregate had been replaced with recycled plastic aggregate. The second stage of the research encompassed strength tests and frost resistance tests of cement-bound materials containing an addition of plastic waste. Possibilities and limitations of use of such materials were analyzed. The obtained results indicated that it is possible to use plastic waste in materials intended for road pavement layers and improved subgrade. Considerable economic and environmental benefits were noted.

DOI: 10.7409/rabdim.022.012

KEYWORDS: cement-stabilized layers, hot-mix asphalt, plastic waste, recycling.

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; b.krawczyk@pwr.edu.pl

²⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

³⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk; dariusz.dobrucki@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Tworzywa sztuczne to materiały pochodzenia organicznego, produkowane z surowców kopalnych lub odnawialnych. Obecnie większość tworzyw sztucznych otrzymuje się z surowców kopalnych, takich jak gaz ziemny, ropa naftowa i węgiel, przy czym tylko od 4% do 6% ropy i gazu zużywanego w Europie przeznaczone jest do produkcji tworzyw sztucznych [1].

Tworzywa sztuczne podzielić można na dwie grupy. Tworzywa termoplastyczne (termoplasty) to grupa tworzyw, które podczas ogrzewania miękną, a po schłodzeniu twardnieją. Zjawisko to jest odwracalne. Do tej grupy należą poliamidy (PA) i polietyleny (PE), będące m.in. przedmiotem badań opisanych w niniejszym artykule. Drugą grupę stanowią tworzywa termoutwardzalne (duroplasty), które podczas ogrzewania podlegają przemianom chemicznym, z wytworzeniem przestrzennej sieci wiązań między cząsteczkami polimerów. Jest to zjawisko nieodwracalne. Do tej grupy zaliczyć można żywice epoksydowe, poliestry i poliuretany.

W przemyśle tworzyw sztucznych w Europie działa około 60 tys. przedsiębiorstw, zatrudniających ponad 1,5 mln pracowników. Zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne oraz ich produkcja systematycznie rośnie. W 2016 r. obroty europejskiego przemysłu tworzyw wyniosły ponad 350 mld euro. Produkcja osiągnęła 60 mln ton, przy czym 8,4 mln ton zostało zebrane i poddane recyklingowi. Głównymi gałęziami przemysłu tworzyw sztucznych są opakowania (40%), budownictwo (20%) i motoryzacja (10%). Użycie materiałów z recyklingu tworzyw sztucznych cieszy się rosnącym zainteresowaniem w przemyśle budowlanym. Wykorzystanie takich materiałów pozwala obniżyć koszty produkcji, a ponadto przyczynia się do praktycznego rozwiązania problemów środowiskowych. Główne obszary zastosowania tworzyw sztucznych w budownictwie to: ramy okien, wykładziny podłogowe, tapety, rury, izolacje kabli i izolacje budynków. Nie są znane na szeroką skalę zastosowania tworzyw sztucznych w budownictwie drogowym. Wyjątek stanowią tu asfalty modyfikowane polimerami, które podobnie jak granulaty gumowy, znane są i stosowane od wielu lat [2-4]. Przy kilkuprocentowej zawartości modyfikatorów w asfalcie, mającym następnie kilkuprocentowy udział w całej mieszance mineralno-asfaltowej, nie stanowią one jednak istotnego materiału z recyklingu w sensie ilościowym/masowym. Zastosowanie polimerów w asfalcie pozostaje notabene zagadnieniem bardzo aktualnym i wciąż rozwijanym [5-6]. Nie są natomiast autorom znane badania nad możliwością zastąpienia kruszywa naturalnego w mieszankach mineralno-asfaltowych granulatem plastikowym ani wykorzystania odpadów plastikowych do wytworzenia warstw stabilizowanych cementem.

1. INTRODUCTION

Plastics include materials of organic origin, produced from fossil or renewable resources. Currently the majority of plastic is obtained from fossil feedstocks, such as natural gas, oil and coal, with only 4% to 6% of yearly usage of oil and gas in Europe employed in the production of plastics [1].

Plastic materials may be divided into two groups. Thermoplastic materials (thermoplastics) are materials that soften when heated and solidify upon cooling. This effect is reversible. This group includes polyamides (PA) and polyethylenes (PE), which, among others, were tested during the research described in this paper. The other group, thermosetting materials (thermosets), are plastics which undergo chemical changes during heating, resulting in creation of a spatial network of linked polymer chains. This hardening effect is irreversible. This group includes epoxy resins, polyesters and polyurethanes.

The plastics industry in Europe comprises around 60 thousand companies, which give employment to over 1.5 million people. The demand for plastics and their production increases systematically. In 2016 the turnover of the European plastics industry exceeded 350 billion euro. The production reached 60 million tons, whereas 8.4 million tons of waste was collected and recycled. The main market sectors of the plastics industry include packaging (40%), construction (20%) and automotive (10%) sectors. The interest in usage of recycled plastics in the construction industry is growing. Use of such materials enables reduction of production costs and contributes to practical solution of environmental problems. The primary areas of usage of plastics in construction include: window frames, floor linings, wallpapers, pipes, cable insulation and thermal insulation. There are no widespread applications of plastics in road construction, apart from the polymer-modified bituminous binders which, along with crumb rubber, have been used for many years [2-4]. Since the polymer content constitutes only several percent of the modified binder, which in turn constitutes several percent of the obtained asphalt mixture, the quantities of polymers used are not significant in the general perspective of plastic recycling. Obviously, the use of polymers in bituminous binders remains a current subject and is being continuously developed [5, 6]. However, the authors are not aware of any studies related to the possibility of replacement of natural aggregate in asphalt mixtures with plastic aggregate or the possibility of usage of plastic waste in cement-bound layers.

W 2016 r. w Europie około 41% z 27 mln ton zebranych odpadów plastikowych posłużyło odzyskowi energii. Około 31% poddano recyklingowi, a 28% zostało składowane, przy czym odzyskowi energii i recyklingowi podlegają przede wszystkim opakowania. Ilość odpadów poddanych recyklingowi w 2016 r. po raz pierwszy przekroczyła ilość odpadów składowanych. Niemniej jednak, ponad 8 mln ton rocznie pozostaje zdeponowane na składowiskach [1]. Są to głównie odpady niejednorodne, nienadające się do klasycznego recyklingu lub wymagające kosztownego procesu separacji i segregacji. Znalezienie zastosowania dla odpadów niejednorodnych pozostaje dużym wyzwaniem w przemyśle recyklingu tworzyw sztucznych.

W Polsce recykling w latach 2006-2016 wzrósł ponad dwukrotnie, jednak na tle krajów zachodniej Europy Polska wciąż uzyskuje niekorzystne wyniki, jeżeli chodzi o składowanie odpadów. Z 1,7 mln ton zebranych odpadów plastikowych ponad 44% zostało składowanych, w porównaniu z 10% w krajach skandynawskich, Austrii, Szwajcarii, Niemczech i krajach Beneluksu, gdzie obowiązują ograniczenia w składowaniu odpadów. Nowych zastosowań odpadów plastikowych autorzy proponują szukać w budownictwie drogowym. Temat wykorzystania materiałów z recyklingu w budownictwie drogowym jest bardzo aktualny. W latach 2015-2017 zrealizowany został projekt „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”, sfinansowany w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. W ramach projektu przeprowadzono badania nad wykorzystaniem granulatu asfaltowego [7-9], badania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych [10-12] oraz badania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych [13]. Badania autorów poświęcone powyższej tematyce przedstawiono w [14-16]. Nie poruszano jednak w projekcie zagadnień związanych z wykorzystaniem materiałów pochodzących z recyklingu tworzyw sztucznych.

Potencjał do wykorzystania tworzyw sztucznych w budownictwie drogowym wydaje się być znaczny. W artykule opisano przeprowadzone badania nad zastosowaniem odpadów plastikowych w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej oraz podłożu ulepszonym. Przeanalizowano możliwość wykorzystania polietylenów (PE) i poliamidów (PA) jako substytut kruszywa i asfaltu w mieszankach mineralno-asfaltowych. Przeanalizowano również możliwość stosowania niejednorodnych (niesortowanych), rozdrobnionych odpadów plastikowych w warstwach podbudowy i podłoża związanych cementem.

In 2016 in Europe, about 41% of the collected 27 million tons of plastic waste was used for energy recovery, around 31% was recycled and 28% was landfilled. Energy recovery and recycling pertain mostly to plastic packaging waste. In 2016, for the first time, the quantity of recycled waste exceeded the quantity of landfilled waste. Nevertheless, it is still over 8 million tons of plastic waste a year that is landfilled [1]. This waste includes mainly unsorted waste, unfit for typical recycling or requiring costly separation and segregation. Finding use for such non-uniform waste remains a considerable challenge in the plastics recycling industry.

In Poland, while the increase in recycling was more than twofold in the years 2006-2016, the percentage of landfill still compares unfavorably with Western European countries. Out of 1.7 million ton of the collected plastic waste, over 44% was landfilled - in contrast to 10% in Scandinavian countries, Austria, Switzerland, Germany and the Benelux, where landfill restrictions had been implemented. The authors propose to seek new applications of plastic waste in road construction. Usage of recycled materials in road construction is a subject of current interest. In the years 2015-2017, a project called "Use of recycled materials" was realized and funded within the Road Innovation Development (RID) joint program, co-financed by the National Centre for Research and Development (NCBR) and the General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA). The project encompassed research on usage of reclaimed asphalt pavement material [7-9], mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures [10-12] and reclaimed concrete pavement material [13]. The authors' works on that subject matter may be found in [14-16]. However, the project did not encompass the issues related to usage of recycled plastic materials.

The potential for application of plastics in road construction appears to be considerable. This article presents the performed research on the possible use of plastic waste in pavement layers and improved subgrade. The possibility of use of polyethylenes (PE) and polyamides (PA) as substitutes of aggregate or bitumen in asphalt mixtures was analyzed. Potential usage of non-uniform (unsorted), fragmented plastic waste material in cement-bound subbase or improved subgrade was also analyzed.

2. TESTING OF REGRANULATED PLASTICS

Research on usage of plastic waste in asphalt mixtures encompassed testing of regranulated low density (LDPE) and high

2. BADANIA REGRANULATÓW TWORZYW SZTUCZNYCH

Do badań nad zastosowaniem odpadów z tworzyw sztucznych w mieszankach mineralno-asfaltowych wykorzystano regranulaty polietylenowe małej (LDPE) i dużej (HDPE) gęstości (Rys. 1) oraz regranulat poliamidowy (PA66) – Rys. 2. Są to wyselekcjonowane i rozdrobnione odpady plastikowe o średnicy < 1 cm, o jednorodnych, przewidywalnych i powtarzalnych właściwościach. Regranulaty poliamidowe i polietylenowe są materiałami o dużej dostępności. Poliamidy stanowią dość szeroką gamę produktów, charakteryzujących się różnicowanymi cechami i składem. Generalnie wykazują dużą sztywność i stabilność kształtu w warunkach oddziaływania obciążeń cieplnych. Średni zakres temperatury dla pracy ciągłej PA mieści się między -30°C a $+100^{\circ}\text{C}$. Poliamidy to ważne tworzywo konstrukcyjne w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i elektrotechnicznym.



Fig. 2. Processed polyamide waste (PA66)

Rys. 2. Przetworzone odpady poliamidowe (PA66)

Polietyleny charakteryzują się dużą elastycznością, odpornością chemiczną i właściwościami elektroizolacyjnymi. Znajdują zastosowanie na bardzo szeroką skalę przy produkcji m.in. sprzętów AGD, folii, opakowań, rur i lin.

Cena wyselekcjonowanych regranulatów z tworzywnych sztucznych porównywalna jest obecnie z ceną asfaltu, przekraczającą 2000 zł/t [17-18]. Może się to jednak zmienić w nieodległej perspektywie, biorąc pod uwagę wzrostową tendencję cen asfaltu i coraz mniejszą dostępność tego surowca, przy jednoczesnej rosnącej podaży regranulatów z tworzyw sztucznych.

Przeprowadzono badania właściwości fizycznych regranulatów z tworzyw sztucznych pod kątem wykorzystania w mieszankach mineralno-asfaltowych (MMA). Wyniki zestawiono w Tabl. 1. Badanie gęstości regranulatów przedstawiono w Rys. 3.

density (HDPE) polyethylenes (Fig. 1) and regranulated PA66 polyamide (Fig. 2). The regranulates are formed from selected and reground plastic waste of radius < 1 cm, with uniform, predictable and reproducible properties. Regranulated polyamides and polyethylenes are widely available. Regranulated polyamides are offered as a broad range of products, with various properties and compositions. They are generally characterized by high stiffness and stability of shape under thermal impact. The average range of service temperatures of PA falls between -30°C and $+100^{\circ}\text{C}$. Polyamide is an important structural material in automotive, aviation and electrotechnical industry.



a)



b)

Fig. 1. Processed polyethylene waste: a) high density (HDPE), b) low density (LDPE)

Rys. 1. Przetworzone odpady polietylenowe: a) dużej gęstości (HDPE), b) małej gęstości (LDPE)

Polyethylenes are characterized by high elasticity, chemical resistance and electric insulation properties. Their use is widespread in production of home appliances, foils and packaging, pipes, ropes etc.

The price of selected plastic regranulates is currently comparable to the price of bitumen, which exceeds 2000 PLN per ton [17-18]; however, it may change shortly, considering the decreasing availability of bitumen and the rising trend in its prices, with concurrent growing supply of regranulated plastics.

Table 1. Physical properties of regranulated plastics
 Tablica 1. Właściwości fizyczne regranulatów z tworzyw sztucznych

Tested property Badana cecha	Reference document Dokument odniesienia	Unit Jednostka	Plastic / Tworzywo sztuczne		
			PA66	LDPE	HDPE
Density / Gęstość	PN-EN ISO 845	g/cm ³	1.226	0.879	0.905
Melting point ^{*)} / Temperatura topnienia ^{*)}	PN-EN ISO 11357-3	°C	230	130	140
^{*)} the temperature at which the material becomes liquid / temperatura, przy której materiał osiąga konsystencję płynną					

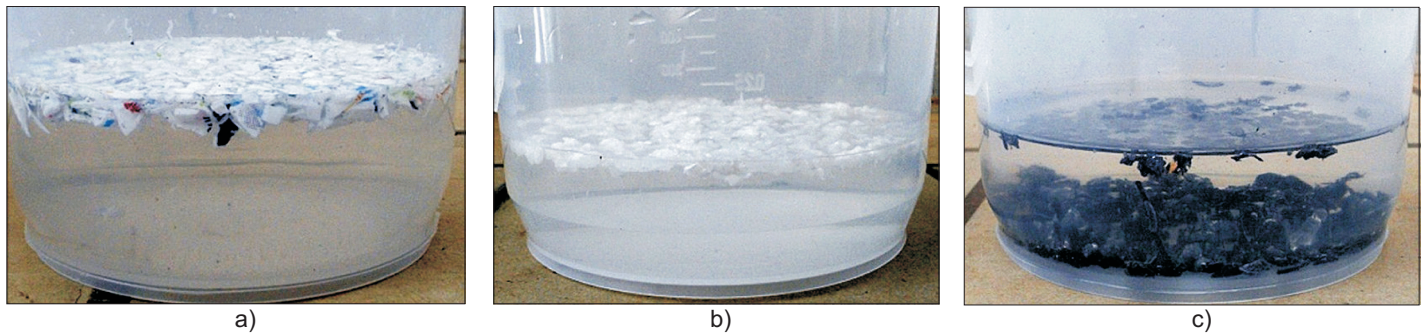


Fig. 3. Testing of density of plastic regranulates: a) HDPE polyethylene, b) LDPE polyethylene, c) PA66 polyamide
 Rys. 3. Badania gęstości regranulatów z tworzyw sztucznych: a) polietylen HDPE, b) polietylen LDPE, c) poliamid PA66

Temperatury topnienia HDPE i LDPE wskazują na możliwość rozpuszczenia ich w mieszance mineralno-asfaltowej. Temperatura topnienia PA66 uniemożliwia bezpośrednie rozpuszczanie w MMA. Jest to temperatura, w której dochodziłoby do zniszczenia mieszanki mineralno-asfaltowej i możliwego zapłonu asfaltu.

3. BADANIA ASFALTÓW

Przeprowadzono prostą próbę rozpuszczenia regranulatu z tworzywa sztucznego w asfalcie, z myślą o ewentualnym zastąpieniu asfaltu w MMA tworzywami sztucznymi, przy czym autorzy podjęli próbę zastosowania większej ilości tworzyw sztucznych w asfalcie, znacznie przekraczającej ilości polimerów stosowanych powszechnie w asfaltach modyfikowanych. Za moment rozpuszczenia tworzywa w asfalcie przyjęto temperaturę, w której wizualnie zanika możliwość rozróżnienia dwóch płynnych materiałów w mieszaninie. Po tym procesie dodatkowo wygrzewano próbkę przez 24 godziny. Stwierdzono jednorodność materiału, gdyż względne różnice między wynikami prób penetracji przeprowadzonych w różnych miejscach próbki nie przekraczały 5%. Regranulaty z PA66, LDPE i HDPE dodano w ilości 10% i 25% do masy asfaltu. Dodanie większych ilości regranulatu do asfaltu nie powiodło się z uwagi na problemy z uzyskaniem jednorodnej mieszaniny asfaltu i rozpuszczonego tworzywa. Przykładowy widok asfaltu zawierającego 25% polietylenu

Physical properties of regranulated plastics were tested in order to analyze their potential suitability for use in asphalt mixtures. The results are presented in Table 1. Density tests of regranulates are shown in Fig. 3.

Melting points of HDPE and LDPE suggest that it is possible to dissolve them in an asphalt mixture. Melting point of PA66 prevents its direct solution in an asphalt mixture, since such a high temperature would damage the asphalt mixture and may possibly lead to ignition of bitumen.

3. TESTING OF BITUMENS

The performed tests included a simple trial involving melting of plastic in bitumen, in order to potentially replace a portion of bitumen in asphalt mixture with plastic. The authors aimed to use a significantly greater content of plastic than the polymer content typically used in modified binders. It was assumed that the point of dissolution of plastic in bitumen is characterized by the temperature at which the two liquid materials in the mixture become visually indiscernible. After this process the samples were subjected to additional heating for 24 hours. It was observed that the obtained mixture became homogeneous, as the relative differences between the results of penetration tests performed at various spots within a given sample did not exceed 5%. Regranulated PA66, LDPE and HDPE were added at the quantity of 10% and 25% of the mass of bitumen. Addition of greater content of regranulated plastic proved impossible due to issues with homogeneity of the obtained mixture. An example of bituminous binder containing 25% of polyethylene is

przedstawiono na Rys. 4. W celu dodania większych ilości polietylenu do asfaltu konieczne byłoby opracowanie odrębnego procesu technologicznego, polegającego na dodawaniu do asfaltu wstępnie rozpuszczonego polietylenu w wyższej temperaturze. Regranulat dodawano do asfaltu twardego 35/50 i miękkiego 160/220. Wyniki badań mieszanin asfaltu i rozpuszczonego tworzywa przedstawiono w Tabl. 2 i 3 oraz na Rys. 5 i 6.

shown in Fig. 4. In order to add greater quantities of polyethylene to bitumen, it would be necessary to develop a separate technological process, involving addition of polyethylene pre-melted at greater temperature. Regranulated plastic was added to hard (35/50) and soft (160/220) bitumen. The results of tests on bitumen/plastic mixtures are presented in Tables 2 and 3 and in Figs 5 and 6.

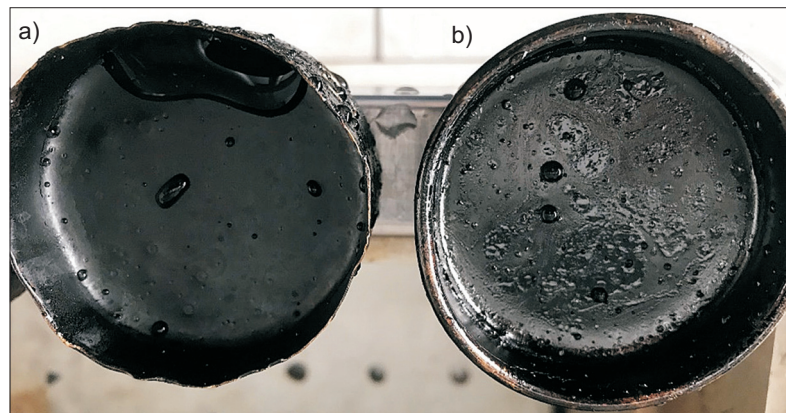


Fig. 4. Bitumen 35/50: a) unmodified, b) containing 25% addition of LDPE polyethylene
Rys. 4. Asfalt 35/50: a) niemodyfikowany, b) z dodatkiem 25% rozpuszczonego polietylenu LDPE

Table 2. Physical properties of the 35/50 bitumen modified with plastics
Tablica 2. Właściwości fizyczne asfaltu 35/50 modyfikowanego tworzywami sztucznymi

Tested property Badana cecha	Reference document Dokument odniesienia	Unit Jednostka	Content of plastic in the bituminous binder Zawartość tworzyw sztucznych w asfalcie							
			none / brak		PA66		LDPE		HDPE	
			0%	10%	25%	10%	25%	10%	25%	
Temperature at which plastic dissolved in the bitumen Temperatura, przy której doszło do rozpuszczenia tworzywa sztucznego w asfalcie	Own procedure Procedura własna	°C	–		240 ^{*)}		190		200	
Penetration at 25°C / Penetracja w 25°C	PN-EN 1426	0.1 mm	48	–	–	15	7	10	5	
Softening point (ring and ball) / Temperatura mięknięcia PiK	PN-EN 1427	°C	55	–	–	100	115	110	130	
^{*)} PA66 did not dissolve in the bitumen, the test was stopped at 240°C due to the risk of bitumen ignition / PA66 nie rozpuścił się w asfalcie, badanie przerwano w temperaturze 240°C z powodu możliwego zapłonu asfaltu										

Table 3. Physical properties of the 160/220 bitumen modified with plastics
Tablica 3. Właściwości fizyczne asfaltu 160/220 modyfikowanego tworzywami sztucznymi

Tested property Badana cecha	Reference document Dokument odniesienia	Unit Jednostka	Content of plastic in the bituminous binder Zawartość tworzyw sztucznych w asfalcie							
			none / brak		PA66		LDPE		HDPE	
			0%	10%	25%	10%	25%	10%	25%	
Temperature at which plastic dissolved in the bitumen Temperatura, przy której doszło do rozpuszczenia tworzywa sztucznego w asfalcie	Own procedure Procedura własna	°C	–		230 ^{*)}		190		200	
Penetration at 25°C / Penetracja w 25°C	PN-EN 1426	0.1 mm	190	–	–	35	20	25	15	
Softening point (ring and ball) / Temperatura mięknięcia PiK	PN-EN 1427	°C	40	–	–	75	90	80	100	
^{*)} PPA66 did not dissolve in the bitumen, the test was stopped at 230°C due to the risk of bitumen ignition / PA66 nie rozpuścił się w asfalcie, badanie przerwano w temperaturze 230°C z powodu możliwego zapłonu asfaltu										

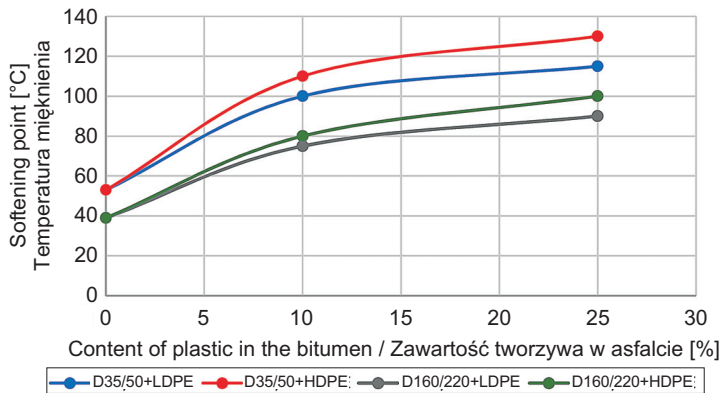


Fig. 5. Softening point of bituminous binders modified with plastics

Rys. 5. Temperatura mięknięcia asfaltów modyfikowanych tworzywami sztucznymi

Temperatura mięknięcia asfaltu zdecydowanie rośnie wraz z zawartością rozpuszczonego tworzywa sztucznego w asfalcie. Widoczne są też różnice w zależności od rodzaju tworzywa – niższe wartości temperatury mięknięcia uzyskano w przypadku zastosowania polietylenu małej gęstości (LDPE), a wyższe w przypadku zastosowania polietylenu dużej gęstości (HDPE). W porównaniu do asfaltów niemodyfikowanych tworzywami sztucznymi, temperatury mięknięcia wzrastają od około 1,9 razy (w przypadku dodania 10% LDPE), do około 2,5 razy (w przypadku dodania 25% HDPE), niezależnie od rodzaju asfaltu (twardy 35/50 lub miękki 160/220).

Penetracja asfaltów modyfikowanych zdecydowanie spada wraz ze wzrostem zawartości rozpuszczonego tworzywa sztucznego w asfalcie, przy czym jest to bardziej widoczne w przypadku asfaltu miękkiego 160/220. Nieznacznie mniejszą penetrację w obu rodzajach asfaltu uzyskano w przypadku zastosowania polietylenu dużej gęstości (HDPE). W porównaniu do asfaltów niemodyfikowanych tworzywami sztucznymi, penetracja jest trzy-czterokrotnie mniejsza w przypadku dodania 10% tworzyw sztucznych do asfaltu twardego 35/50 (w zależności od rodzaju tworzywa) i nawet dziesięciokrotnie mniejsza w przypadku dodania 25% tworzyw sztucznych do asfaltu miękkiego 160/220.

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o dużej (10-25%) zawartości polietylenów rozpuszczonych w asfalcie będą przedmiotem dalszych prac badawczych autorów.

4. BADANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

Tworzywa sztuczne w mieszance mineralno-asfaltowej mogą być stosowane w postaci rozpuszczonej (jako dodatek do

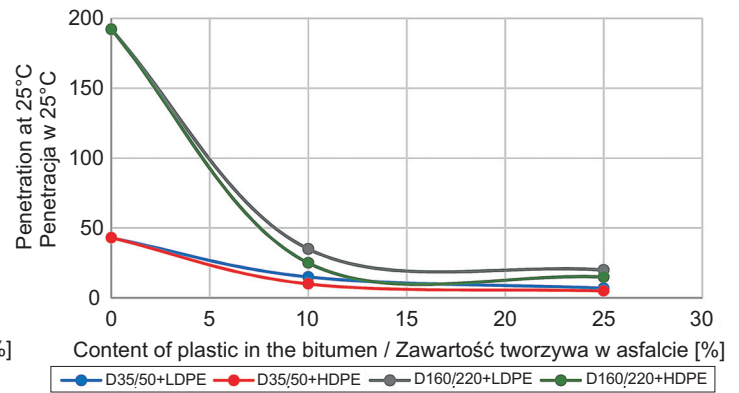


Fig. 6. Penetration of bituminous binders modified with plastics
Rys. 6. Penetracja asfaltów modyfikowanych tworzywami sztucznymi

Softening point of the binder increases considerably with an increase in the content of plastic introduced into the bitumen. Differences related to the type of plastic used are also visible – lower softening point values were obtained when LDPE was used and higher when HDPE was used. In comparison to neat bitumen, softening point values increase by a factor of approx. 1.9 (in the case of 10% LDPE content) to approx. 2.5 (in the case of 25% HDPE content), irrespective of the type of bitumen (hard 35/50 or soft 160/220).

Penetration of bitumen considerably decreases with an increase in content of plastic dissolved in the bitumen. This trend is more pronounced for the soft bitumen 160/220. For both bitumens used, penetration was slightly lower when high density polyethylene (HDPE) was introduced. In comparison to neat bitumen, penetration decreased by a factor of 3 to 4 for the hard 35/50 bitumen with 10% of plastic (depending on the type of plastic) and even by a factor of 10 for the soft 160/220 bitumen with 25% of plastic.

Testing of asphalt mixtures containing binders with high polyethylene content (10-25%) will be the subject of future research undertaken by the authors.

4. TESTING OF ASPHALT MIXTURES

Plastics may be introduced into hot-mix asphalt in two forms: either dissolved in the binder (as described in the above section) or as plastic aggregate (replacing the natural aggregate). The research works described in this paper also encompassed testing of an asphalt concrete mix (AC8S) intended for the lowest traffic categories (KR1-KR2). In the tested mixture, natural aggregate was replaced with

asfaltu – jak w opisanych powyżej badaniach) lub w postaci granulatu, jako zamiennik kruszywa naturalnego. W ramach prac przedstawionych w niniejszym artykule przeprowadzono również badania mieszanki mineralno-asfaltowej (AC8S), przewidzianej dla kategorii ruchu KR1-KR2, w której kruszywo naturalne zastąpiono granulem plastikowym. W mieszance użyto regranulatu PA66, o nieco większym uziarnieniu (Rys. 7) niż przy próbie rozpuszczenia w asfalcie, o gęstości 1,35-1,37 g/cm³ (w zależności od frakcji).

Fig. 7. Polyamide aggregate (PA66) for the asphalt mixture
Rys. 7. Grysy poliamidowy (PA66) do mieszanki mineralno-asfaltowej

plastic aggregate. The mixture contained regranulated PA66 (Fig. 7) with density of 1.35-1.37 g/cm³ (depending on fraction) and particle size slightly greater than that used in binder testing.



Do wytworzenia MMA wykorzystano następujące frakcje PA66: 0/0,125 mm, 0,125/2 mm, 2/5,6 mm oraz 5,6/8 mm. Jako wypełniacza (0/0,063 mm) użyto kruszywa naturalnego. Mieszankę zaprojektowano na asfalcie 50/70 z dodatkiem adhezyjnym Wetfix BE. Na podstawie sprawdzonej recepty AC8S zaprojektowano 5 mieszanek o różnej zawartości granulatu plastikowego, ale o identycznym uziarnieniu, mierzonym objętościowo (% v/v). Zawartość frakcji granulatu plastikowego (PA66) w mieszance mineralnej (MM) zwiększano od 0% do 100%, co 25%.

Widok próbek MMA, w których kruszywo naturalne zastąpiono w 100% granulem poliamidowym, przedstawiono na Rys. 8.

The following fractions of PA66 were used in the asphalt mixture: 0/0.125 mm, 0.125/2 mm, 2/5.6 mm and 5.6/8 mm. The filler used (0/0.063 mm) consisted of natural material. The mixture was designed using a 50/70 bitumen with addition of Wetfix BE adhesion promoter. Based on the known and tested AC8S recipe, 5 mixture variants were designed. They were characterized by varying plastic aggregate content, but the same overall grading (% v/v). The level of replacement of natural aggregate with plastic aggregate (PA66) increased from 0% to 100%, at a step of 25%.

Samples of asphalt mixture in which 100% of natural aggregate has been replaced with polyamide aggregate are shown in Fig. 8.



Fig. 8. AC8S asphalt mixture with polyamide aggregate (PA66)
Rys. 8. Mieszanka mineralno-asfaltowa AC8S z granulem poliamidowym (PA66)

Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych o różnej zawartości granulatu poliamidowego przedstawiono w Tabl. 4.

Test results obtained for asphalt mixtures with varying proportion of polyamide aggregate used are shown in Table 4.

Table 4. Test results of asphalt mixtures with polyamide aggregate
Tablica 4. Badania mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem poliamidowym

Tested property Badana cecha		Reference document Dokument odniesienia	Unit Jednostka	Level of replacement of natural aggregate with polyamide aggregate [%] Zawartość granulatu poliamidowego w MM				
				0	25	50	75	100
Maximum specific density of asphalt mixture Gęstość MMA	ρ_{mv}	PN-EN 12697-5 +AC:2012 (volumetric procedure in water / metoda objętościowa w wodzie)	g/cm ³	2.474	2.263	2.052	1.841	1.629
Bulk density of asphalt mixture Gęstość objętościowa MMA	ρ_{bssd}	PN-EN 12697-6 (procedure B, 2x50 impacts / metoda B, 2x50 uderzeń)	g/cm ³	2.411	2.165	1.892	1.600	1.370
Air voids / Zawartość wolnych przestrzeni	v_m	PN-EN 12697-8	% (v/v)	2.6	4.3	7.8	13.1	15.9
Wet indirect tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie próbek mokrych	ITS _w	PN-EN 12697-12	kN	780	544	411	370	297
Dry indirect tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie próbek suchych	ITS _d		kN	870	605	457	414	311
Resistance to water / Odporność na wodę	ITSR		%	90	90	90	92	96

Gęstość MMA spada wyraźnie – liniowo wraz ze wzrostem zawartości PA66 w MM. W przypadku spełnienia przez taką mieszankę wymagań WT-2 [19], korzyści środowiskowe i ekonomiczne wynikające z możliwości wydajniejszego transportu mieszanek o dużej zawartości PA66 są nie do przecenienia. Mieszanka, w której kruszywo naturalne zastąpiono w całości granulatem poliamidowym jest o ponad 40% lżejsza.

Zawartość wolnych przestrzeni w MMA zdecydowanie rośnie wraz ze wzrostem zawartości PA66 w MM. Nie są przy tym spełnione wymagania WT-2 odnośnie dopuszczalnej zawartości wolnych przestrzeni w MMA, nawet przy zawartości PA66 w MM na poziomie 25%. Należy jednak zaznaczyć wyraźnie, że mimo braku spełnienia wymagań dopuszczalnej zawartości wolnych przestrzeni, spełnione są wymagania ITSR odporności na działanie wody. Co więcej, widać wzrost odporności na działanie wody wraz ze wzrostem zawartości PA66 w mieszance, a największe wartości ITSR (96%) uzyskano dla mieszanki, w której kruszywo naturalne zastąpiono w całości granulatem poliamidowym. Może to być spowodowane wysoką mrozoodpornością samego granulatu poliamidowego i dobrą przyczepnością asfaltu do takiego granulatu. Rozważyć należy odstąpienie od wymagań dopuszczalnej zawartości wolnych przestrzeni w przypadku spełnienia pozostałych wymagań stawianych MMA w WT-2.

Maximum specific density of the mixture displays a noticeable linear decrease with an increase in the proportion of PA66 used. If the criteria provided in the Polish technical requirements WT-2 [19] are met, the potential environmental and economic benefits resulting from more effective transport of mixtures with high PA66 content cannot be overestimated. Mixture in which natural aggregate has been entirely replaced with polyamide aggregate is lighter by over 40%.

Air void content increases considerably with an increase in the level of replacement of natural aggregate with PA66. While the WT-2 requirements regarding the permissible air void content in asphalt are not met even at the level of 25% PA66, it should be noted that the requirements considering ITSR (resistance to water) are still fulfilled. Moreover, an improvement in ITSR values with an increase in PA66 content is visible, with the highest values (96%) obtained for the mixture in which natural aggregate has been entirely replaced with polyamide aggregate. This fact may be related to high frost resistance of the polyamide aggregate itself and good adhesion between bitumen and such aggregate. When all the other WT-2 requirements are met, suspension of the permissible air voids criterion for the given asphalt mixture should be considered.

Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek MMA spada wraz ze wzrostem zawartości granulatu PA66 w MM, przy czym WT-2 nie stawia wymagań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (ani odporności na deformacje trwałe) dla MMA AC8S przewidzianych dla ruchu lekkiego KR1-KR2. W trakcie przygotowywania próbek do badania wytrzymałości zauważono, że mieszanki z granulatem poliamidowym stygną szybciej niż mieszanki z kruszywem naturalnym. Po podgrzaniu do 145°C MMA, w której kruszywo naturalne w MM zastąpiono w całości PA66 wystygła w ciągu 5 minut do 127°C, podczas gdy MMA z kruszywem wyłącznie naturalnym wystygła do 139°C.

Widok poddanej badaniu koleinowania próbki, w której kruszywo naturalne w całości zastąpiono PA66, przedstawiono na Rys. 9. Wstępne badania koleinowania wykazały znacznie szybszy przyrost koleiny w mieszance, w której całe kruszywo naturalne zastąpiono granulatem poliamidowym PA66 (Rys. 10). Zaznaczyć przy tym należy, że WT-2 nie stawia wymagań koleinowania dla mieszanek przeznaczonych do ruchu KR1-KR2.



While the indirect tensile strength of asphalt mixture samples decreases with an increase in the proportion of PA66 used, the WT-2 document provides no indirect tensile strength requirements (nor permanent deformation requirements) for AC8S asphalt concretes intended for light traffic (KR1-KR2). During preparation of specimens for strength tests it was noted that mixtures containing polyamide aggregate cooled down faster than mixtures with natural aggregate. Upon being heated to 145°C, the asphalt mixture in which natural aggregate had been entirely replaced with PA66 cooled down to 127°C in 5 minutes, while the mixture containing only natural aggregate cooled down to 139°C in 5 minutes.

Photographs taken after rutting test of sample with 100% of natural aggregate replaced with PA66 are shown in Fig. 9. Initial rutting tests indicated much faster development of rut in the mixture in which natural aggregate had been entirely replaced with polyamide aggregate PA66 (Fig. 10). However, it should be noted that the WT-2 document provides no requirements regarding rutting of mixtures intended for traffic categories KR1-KR2.



Fig. 9. Rutting test of the asphalt mixture with natural aggregate entirely replaced with polyamide aggregate
Rys. 9. Badanie koleinowania mieszanki mineralno-asfaltowej, w której kruszywo naturalne zastąpiono w całości granulatem poliamidowym

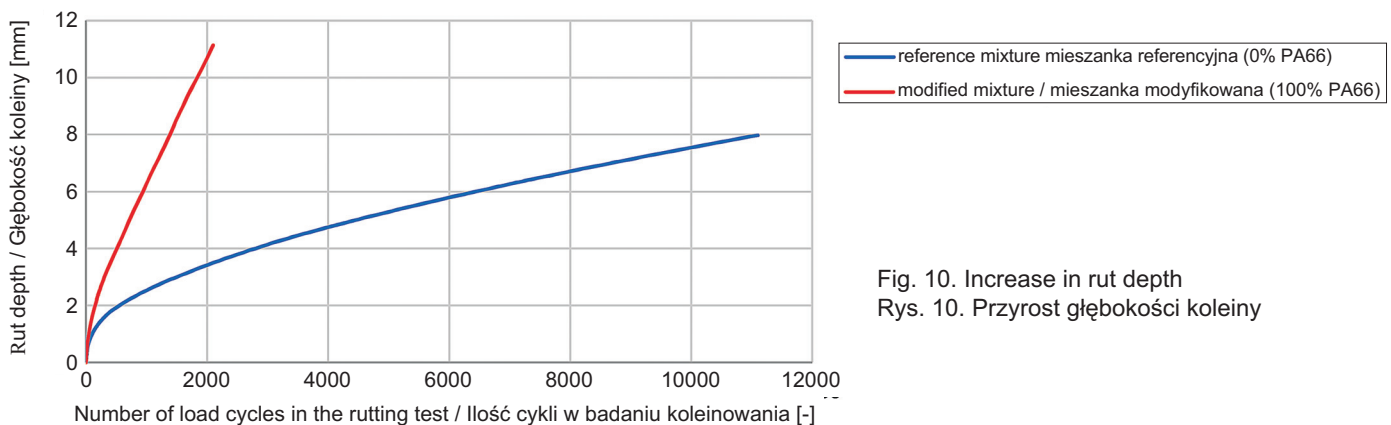


Fig. 10. Increase in rut depth
Rys. 10. Przyrost głębokości koleiny

5. BADANIA MIESZANEK ZWIĄZANYCH CEMENTEM

Do wytworzenia mieszanek związanych cementem wykorzystano zmieszane odpady plastikowe różnego rodzaju, o różnych właściwościach fizycznych. Pozyskanie takiego surowca nie wymaga precyzyjnej segregacji, która jest głównym kosztem recyklingu. Widok nieprzetworzonych, zmieszanych odpadów plastikowych przedstawiono na Rys. 11.

Zmieszane odpady plastikowe rozdrobniono mechanicznie. Gęstość objętościowa rozdrobnionej mieszanki plastikowej ρ_o wynosiła $0,996 \text{ g/cm}^3$. Widok rozdrobnionych odpadów plastikowych przedstawiono na Rys. 12.



Fig. 11. Unprocessed plastic waste
Rys. 11. Widok nieprzetworzonych odpadów plastikowych

Na bazie mieszanki mineralnej (granodioryt 0/8), pozostającej jako naddatek z produkcji kruszywa, sporządzono 3 zaroby próbne, o różnej zawartości odpadów plastikowych i stałej zawartości cementu na poziomie 8%.

Wyniki badań mieszanek związanych cementem o zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych 10% i 20%, w porównaniu z mieszanką nie zawierającą odpadów plastikowych, zestawiono w Tabl. 5. Przeprowadzono badania wytrzymałości na ścislenie oraz badania mrozoodporności w odniesieniu do WT-5 [20]. Widok próbki poddanej badaniu ścislenia – przed i po zniszczeniu – przedstawiono na Rys. 13. Z uwagi na niejednorodność materiału odpadowego badania przeprowadzono na dwóch seriach próbek, uzyskując zbliżone wyniki.

Gęstość mieszanki maleje liniowo wraz ze wzrostem zawartości odpadów plastikowych w mieszance. Mieszanka o zawartości odpadów plastikowych 20% jest o około 20% lżejsza od mieszanki niezawierającej odpadów. W przypadku spełnienia przez taką mieszankę wymagań stawianych mieszankom w WT-5, stwarza do potencjalnie ogromne korzyści ekonomiczno-środowiskowe, związane z transportem lżejszego materiału.

5. TESTING OF CEMENT-BOUND MIXTURES

Cement-bound mixtures were prepared using unsorted plastic waste with non-uniform physical properties. Obtaining such material does not require precise segregation, which is the main component in recycling costs. A view of unprocessed, mixed plastic waste is shown in Fig. 11.

Unsorted plastic waste was subjected to mechanical fragmentation. Bulk density ρ_o of the obtained plastic mix equaled 0.996 g/cm^3 . A view of fragmented plastic waste is presented in Fig. 12.



Fig. 12. Fragmented plastic waste
Rys. 12. Rozdrobnione odpady plastikowe

Using mineral material (granodiorite 0/8) obtained as excess fraction from production of aggregate, 3 trial mixtures were prepared, with constant value of cement content (8%) and varying content of plastic waste.

Table 5 presents a comparison of the results of tests performed on cement-bound mixtures containing 10% and 20% fragmented plastic waste and a reference mixture with no plastic waste. Compressive strength and frost resistance according to WT-5 [20] were tested. A specimen used in compressive strength testing – before and after failure – is shown in Fig. 13. Due to non-uniform properties of the waste material, tests were performed on two series of specimens. The results obtained for the two series were similar.

Bulk density of the mixture decreases linearly with an increase in plastic waste content. Mixture containing 20% of plastic waste is around 20% lighter than the mixture without waste. If the criteria provided in the WT-5 document are met, the potential environmental and economic benefits resulting from transport of lighter material may be considerable.

Table 5. Test results of cement-bound mixtures
 Tablica 5. Badania mieszanek związanych cementem

Tested property Badana cecha	Reference document Dokument odniesienia	Unit Jednostka	Content of plastic waste in the mixture [%] Zawartość odpadów plastikowych w mieszance		
			0	10	20
Water absorption Nasiąkliwość	PN-88/B-06250	%	9.5	12.2	14.6
Bulk density (based on dimensions, dry specimen) Gęstość objętościowa (na podstawie wymiarów, próbka sucha)	PN-EN 12390-7	g/cm ³	2.075	1.849	1.683
Compressive strength (after 28 days) Wytrzymałość na ściskanie (po 28 dniach)	PN-EN 13286-41	MPa	5.8	2.9	1.6
Frost resistance Mrozoodporność	WT-5 2010 Item 1.2.8 / Punkt 1.2.8	–	0.99	0.92	0.84

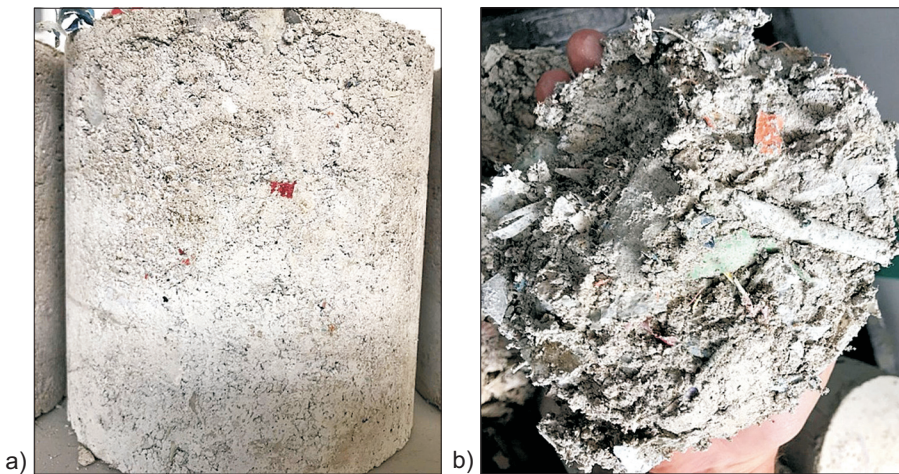


Fig. 13. Specimen containing 20% of plastic waste before (a) and after (b) compressive strength testing

Rys. 13. Widok próbki o zawartości 20% odpadów plastikowych przed (a) i po badaniu (b) wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość mieszanek na ściskanie maleje istotnie wraz ze wzrostem zawartości odpadów plastikowych w mieszance. Mieszanka o zawartości 10% odpadów plastikowych spełnia wymagania WT-5 stawiane podłożu ulepszonemu dla wszystkich kategorii ruchu KR1-KR7 oraz wymagania stawiane podbudowom pomocniczym dla ruchu lekkiego KR1-KR2. Mieszanka o zawartości 20% odpadów plastikowych nie spełnia wymagań wytrzymałości na ściskanie wg WT-5, spełnia jednak nowsze wymagania Katalogów Typowych Nawierzchni [21-22] stawiane warstwom ulepszonemu podłoża (C0.4/0.5) dla wszystkich Kategorii Ruchu KR1-KR7. Jednocześnie mieszanka o zawartości odpadów plastikowych 20% zdecydowanie spełnia wymagania mrozoodporności stawiane w WT-5, nawet dla podbudów zasadniczych wszystkich kategorii ruchu KR1-KR7.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono badania możliwości wykorzystania odpadów plastikowych w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej i podłoża ulepszonemu. Wskazano na ograniczenia

Compressive strength of the mixtures decreases significantly with an increase in plastic waste content. The mixture with 10% content of plastic waste meets the WT-5 requirements for improved subgrade intended for all traffic categories – KR1 through KR7 – as well as requirements for subbases for light traffic (KR1-KR2). The mixture with 20% content of plastic waste does not meet the compressive strength requirements according to WT-5, but it does meet the newer requirements of the Polish catalogs of typical pavement structures [21, 22] regarding improved subgrade (C0.4/0.5) across all traffic categories (KR1-KR7). At the same time, the mixture with 20% of plastic waste meets the frost resistance requirements provided in the WT-5 document – even for base courses across KR1-KR7 traffic categories.

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Research on the possible use of plastic waste in road pavement layers or improved subgrade was presented in the article. Limitations related to usage of this type of materials

w stosowaniu tego typu materiałów i zaproponowano dalsze kierunki rozwoju badań. Dotychczasowe badania wykazały, że odpady plastikowe mogą być wykorzystywane do produkcji pełnowartościowych materiałów dla niektórych zastosowań w budownictwie drogowym. Materiały „modyfikowane” odpadami plastikowymi mają z zasady gorsze właściwości fizyczne od materiałów opartych na tradycyjnych surowcach w budownictwie drogowym, mogą jednak spełniać wymagania aktualnych dokumentów technicznych dla wybranych warstw konstrukcji nawierzchni. Dotyczy to zwłaszcza mieszanek związanych cementem przeznaczonych na warstwy podłoża ulepszanego. Dużą wartością dodaną w takim wypadku są korzyści społeczno-ekonomiczne i środowiskowe, wynikające z transportu łatwo dostępnego, lżejszego materiału (mniej operacji transportowych i mniejsza odległość transportu) – co przekłada się na niższe ceny wykonania. Dodatkowo zostaje w dużym stopniu rozwiązany bardzo istotny problem utylizacji i składowania dużej ilości odpadów plastikowych. Złoża naturalnych materiałów (zwłaszcza kruszyw) mogą być eksploatowane w mniejszym stopniu, zredukowanym proporcjonalnie do zastosowania odpadów plastikowych w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowych oraz podłoża ulepszanego.

W dalszych pracach badawczych autorzy skupią się przede na wykorzystaniu odpadów plastikowych w mieszankach związanych cementem i gruntach stabilizowanych cementem. Przeprowadzone zostaną również badania mieszanek mineralno-asfaltowych o dużej (10-25%) zawartości polietylenów rozpuszczonych w asfalcie oraz wykonany zostanie odcinek doświadczalny nawierzchni ścieżki rowerowej z mieszanki AC8S, w której kruszywo naturalne w całości zastąpiono granulatem poliamidowym. Zastosowanie odpadów plastikowych jako substytutu asfaltu lub kruszywa w mieszankach mineralno-asfaltowych uznano jednak – na podstawie przeprowadzonych badań – za bardzo kłopotliwe i obecnie mniej uzasadnione ekonomicznie z powodu konieczności prowadzenia kosztownej precyzyjnej segregacji w celu uzyskania odpadów o jednorodnych właściwościach fizycznych. Jednorodność odpadów plastikowych i segregacja, jak wykazały badania, nie jest wymagana w przypadku zastosowania odpadów do wytworzenia mieszanek/gruntów stabilizowanych cementem.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy pragną skierować specjalne podziękowania do firmy PRO-TRA Building sp. z o.o. i pana Zbigniewa Ziajki za wsparcie procesu badawczego i dostarczenie materiałów do badań.

were described and further directions of research were proposed. Previous research has shown that plastic waste may be used in production of fully usable materials for chosen applications in road construction. Materials “modified” with plastic waste generally demonstrate worse physical properties than the materials traditionally used in road construction, but they may meet the requirements of current technical documents for selected pavement layers. This is true especially for cement-bound mixtures intended for improved subgrades. A significant added value lies in the social, economic and environmental benefits resulting from transport of material that is lighter and widely available (less transport operations and shorter distance) – which translates into lower construction costs. The idea also considerably contributes to solution of the significant issue of management and landfilling of large quantities of plastic waste. Natural resource deposits (especially aggregates) may be exploited to a lesser degree, reduced proportionally to the usage of plastic waste in pavement layers and improved subgrade.

In further research works the authors will primarily focus on the use of plastic waste in cement-bound mixtures and cement-stabilized soils. Tests will also be conducted on asphalt mixtures with high content of polyethylene introduced into bitumen (10-25%). A trial section of a bicycle path pavement will be constructed using the AC8S mixture with natural aggregate entirely replaced by polyamide aggregate. However, based on the performed research, the use of plastic waste as a substitute for bitumen or aggregate in asphalt mixtures is deemed very problematic by the authors; currently it seems less economically feasible due to the high cost of sorting necessary to obtain waste with uniform physical properties. As demonstrated by the test results, segregation of waste or obtaining its uniform properties is not necessary in the case of use of waste in cement-bound mixtures/soils.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the PRO-TRA Building sp. z o.o. company and Mr. Zbigniew Ziajka for their support of the research process and providing materials for the tests.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Plastic – the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticEurope Association of Plastics Manufacturers, 2018
- [2] Baker R.E.: Polymer Modified Bitumen. Indian Highways, 26, 1, 1998, 85-94

- [3] *Murphy M., O'Mahony M., Lycett C., Jamieson I.*: Recycled Polymers for Use as Bitumen Modifier. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **13**, 4, 2001, 306-314, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(306)
- [4] *Panda M., Mazumdar M.*: Utilization of reclaimed polyethylene in bituminous paving mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14**, 6, 527-530, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(527)
- [5] *Moghaddam T.B., Karim M.R., Soltani M.*: Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *Journal of Engineering Science and Technology*, **8**, 3, 2013, 264-271
- [6] *Abdullah M.E., Siti Aminah A.K., Ramadhansyah P.J., Haryati Y., Norhidayah A.H., Che Norazman C.H.*: Effect of Waste Plastic as Bitumen Modified in Asphalt Mixture. *MATEC Web of Conferences*, **103**, 2017, ID article: 09018, DOI: 10.1051/mateconf/201710309018
- [7] *Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.2.1. Wytyczne pozyskania i oceny przydatności destruktu i granulatu asfaltowego do recyklingu na gorąco w otaczarkach. Gdańsk, 2019
- [8] *Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.2.2. Zalecenia w zakresie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem asfaltowym w otaczarkach o działaniu cyklicznym. Gdańsk, 2019
- [9] *Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.2.3. Wytyczne cząstkowe w zakresie wymagań i projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem asfaltowym produkowanym na gorąco. Gdańsk, 2019
- [10] *Dołżycki B.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.4.1. Wytyczne stosowania technologii recyklingu głębokiego na zimno z wykorzystaniem emulsji i cementu wraz z zasadami projektowania nawierzchni z wykorzystaniem warstw z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE). Gdańsk, 2019
- [11] *Dołżycki B.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.4.2. Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Gdańsk, 2019
- [12] *Mirski K., Bańkowski W., Horodecka R.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.4.3. Zalecenia bezpiecznego stosowania destruktu asfaltowego ze smołą w warstwach wykonanych w technologii mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych MCE. IBDiM, Warszawa, 2019
- [13] *Szydło A., Stilger-Szydło E., Krawczyk B., Mackiewicz P., Skotnicki Ł., Kuźniewski J., Dobrucki D.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.6. Wytyczne wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych, 2018
- [14] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Suitability of aggregate recycled from concrete pavements for layers made of unbound and cement bound mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 39-53, DOI: 10.7409/rabdim.018.003
- [15] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Assessment criteria of the recycled aggregate cement bound bases. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 2, 2019, 109-126, DOI: 10.7409/rabdim.019.007
- [16] *Krawczyk B., Stilger-Szydło E.*: Przydatność materiałów pochodzących z recyklingu betonu przy realizacji budowli ziemnych i podłoża ulepszonego obiektów infrastruktury transportowej. *Przegląd Komunikacyjny*, **73**, 11, 2018, 37-43
- [17] <https://www.plastech.pl/ceny-tworzyw>, 08.02.2022
- [18] <https://www.ornen-asfalt.pl>, 08.02.2022
- [19] WT-2 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne. GDDKiA, Warszawa 2014
- [20] WT-5 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. GDDKiA, Warszawa, 2010
- [21] *Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., Stienss M.*: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [22] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardega R., Krawczyk B.*: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.

STANDARDS / NORMY CYTOWANE

PN-EN ISO 845:2010 Tworzywa sztuczne porowate i gumy – Oznaczenie gęstości pozornej

PN-EN ISO 11357-3:2018 Tworzywa sztuczne – Różnicowa kalorymetria skaningowa (DSC) – Część 3: Oznaczenie temperatury oraz entalpii topnienia i krystalizacji

PN-EN 1426:2015 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie penetracji igłą

PN-EN 1427:2015 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie temperatury mięknięcia – Metoda Pierścieni i Kula

PN-EN 12697-5:2010 +AC:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 5: Oznaczenie gęstości

PN-EN 12697-6:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 6: Oznaczenie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej

PN-EN 12697-8:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 8: Oznaczenie zawartości wolnej przestrzeni

PN-EN 12697-12:2008 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych

PN-88/B-06250:1998 Beton zwykły

PN-EN 12390-7:2011 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu

PN-EN 13286-41:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 41: Metoda oznaczania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym